

EINFLUSS VON EISEN UND KUPFER AUF DIE ENTSTEHUNG VON ACETYLTETRAHYDROPYRIDIN (ATHP) UND 2-ACETILPYRIDIN (2-AP) IN WEIN

MARTIN POUR NIKFARDJAM und LENA KUNZ

Staatliche Lehr- und Versuchsanstalt für Wein- und Obstbau
D-74189 Weinsberg, Traubenplatz 5
E-Mail: Martin.PourN@lvwo.bwl.de

Der Mäuselton in Wein ist ein stark qualitätsmindernder Fehlton, welcher durch 2-Acetyltetrahydropyridin (ATHP) verursacht wird. Als Endprodukt bei der Bildung aus Methylglyoxal und Prolin während der Maillard-Reaktion entsteht unter oxidativen Bedingungen aus ATHP die Substanz 2-Acetylpyridin (2-AP). Die Oxidationsprozesse in Wein werden vor allem durch Eisen und Kupfer initiiert, allerdings sind die Auswirkungen beider Übergangsmetalle auf die Entstehung von ATHP und 2-AP nicht bekannt. Eine Aufklärung ist jedoch zwingend erforderlich, da Kupfer in Form von Kupfersulfat oder Kupfercitrat zur Weinschönung verwendet wird und Eisen aus Legierungen der Materialien zur Weinherstellung abgegeben werden kann. Deshalb wurde in Modellversuchen mit unterschiedlichen Eisen- und Kupfergehalten die Entstehung von ATHP und 2-AP mittels GC-SNIF und GC-MS untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass sich durch erhöhte Gehalte beider Metallionen ein mäuseartiges Fehl aroma schneller entwickelte als in metallfreien Lösungen. Dabei könnte unter Weinbedingungen neben ATHP und 2-AP auch ein Zwischenprodukt der Oxidation von ATHP zu 2-AP zum Fehl aroma beitragen.

Schlagwörter: Mäuselton, Weinfehler, Oxidation, Maillard-Reaktion, GC-MS, GC-SNIF

Influence of iron and copper on the formation of acetyltetrahydropyridine (ATHP) and 2-acetylpyridine (2-AP) in wine. The mousy off-flavour in wine is a significantly quality-reducing off-flavour caused by 2-acetyltetrahydropyridine (ATHP). As the end product of the formation from methylglyoxal and proline during the Maillard reaction, the substance 2-acetylpyridine (2-AP) is formed from ATHP under oxidative conditions. The oxidation processes in wine are mainly initiated by iron and copper, but the effects of both transition metals on the formation of ATHP and 2-AP are not known. But clarification is necessary, because copper in the form of copper sulfate or copper citrate is used for wine fining and iron can be released from alloys of the equipment used for wine production. Therefore, the formation of ATHP and 2-AP was investigated in model experiments with different iron and copper contents using GC-SNIF and GC-MS. It could be shown that a mousy off-flavour developed faster than in metal-free solutions due to increased levels of both metal ions. In addition to ATHP and 2-AP, an intermediate product of the oxidation of ATHP to 2-AP could also contribute to this off-flavour under wine conditions.

Keywords: mousy off-flavour, off-flavours in wine, oxidation, Maillard reaction, GC-MS, GC-SNIF

2-Acetylpyridin (2-AP) ist das Oxidationsprodukt von 2-Acetyltetrahydropyridin (ATHP), welches 1984 als Hauptverursacher des Mäuseltons in Wein identifiziert wurde (STRAUSS und HERESZTYN, 1984). Dabei handelt es sich um einen Weinefehler, der die Wissenschaft schon seit über 100 Jahren beschäftigt (MÜLLER und OSTERWALDER, 1913; SCHANDERL, 1948; TUCKNOTT, 1977; GRBIN et al., 1995; LAY, 2003). Es wurde lange Zeit über die Entstehung dieses Fehlromas diskutiert. Heute ist bekannt, dass der Mäuselton sowohl mikrobiologisch durch verschiedene Hefen und Milchsäurebakterien als auch chemisch im Zuge der Maillard-Reaktion entstehen kann (HERESZTYN, 1986; COSTELLO und HENSCHKE, 2002; SNOWDON et al., 2006; WANG und HO, 2012; KÜNZLER und POUR NIKFARDJAM, 2013). Während es hinsichtlich der mikrobiologischen Entstehung zahlreiche Untersuchungen gibt, ist über die chemische Entstehung und deren Einflussfaktoren nur wenig bekannt (TEMPÈRE et al., 2019).

Bereits 1948 erkannte SCHANDERL, dass dieser Weinefehler hauptsächlich auf eine chemisch-physikalische Entstehung zurückzuführen ist. Er stellte fest, dass der Mäuselton durch Erhöhung des Redoxpotentials mit Hilfe starker Oxidationsmittel in nahezu allen Weinen erzeugt werden kann.

Erst 1984 wurden von STRAUSS und HERESZTYN beide Isomere von ATHP in Proben mit Mäuselton mittels GC-MS nachgewiesen. In gesunden Weinen oder Weinen, die anders mikrobiologisch verdorben waren, konnten sie hingegen kein ATHP nachweisen. 2013 erkannten KÜNZLER und POUR NIKFARDJAM in ihren Untersuchungen, dass ATHP auch auf rein chemischem Weg aus Methylglyoxal und Prolin in Wein gebildet werden kann. Dabei stellten sie fest, dass ATHP instabil ist und relativ rasch zu 2-AP, welches ausschließlich Auswirkungen auf den Geschmack, nicht jedoch auf den Geruch hat, oxidiert wird.

Es existieren zwei Isomere von ATHP, deren Vorliegen pH-Wert-abhängig ist. Bei niedrigen pH-Werten, wie sie im Wein üblich sind, liegt die nichtflüchtige Amino-Form (2-Acetyl-1,4,5,6-tetrahydropyridin) vor.

Durch Erhöhung des pH-Wertes wird die flüchtige Imino-Form (2-Acetyl-3,4,5,6-tetrahydropyridin) gebildet. Sie ist für den typischen Geruch des Mäuseltons verantwortlich und entsteht im Mund bei Kontakt mit dem neutralisierenden Speichel, wodurch sich der charakteristische Geschmack entfaltet (SNOWDON et al., 2006). Die chemische Bildung von ATHP erfolgt aus Prolin und Methylglyoxal (Abb. 1), welches im Zuge der Maillard-Reaktion oxidativ aus Glucose gebildet wird (BELITZ et al., 2008; WANG und HO, 2012). Eine Erhöhung der Reaktionstemperatur führt zu einer Reaktionsbeschleunigung, während antioxidativ wirksame Substanzen die Reaktionsgeschwindigkeit reduzieren, indem sie die oxidative Bildung von Methylglyoxal hemmen. Demzufolge beschleunigen Oxidationsmittel die Bildung von ATHP (KÜNZLER und POUR NIKFARDJAM, 2013).

Die im Wein ablaufenden Oxidationsvorgänge sind äußerst komplex und von verschiedenen Faktoren abhängig. Das liegt vor allem daran, dass gasförmiger Sauerstoff reaktionsträge ist. Eine Reaktion findet nur statt, wenn die Elektronen z. B. durch Übergangsmetalle oder freie Radikale einzeln übertragen werden können (DANILEWICZ, 2003). DANILEWICZ und WALLBRIDGE (2010) publizierten ihre ausführlichen Diskussionen zu den Oxidationsvorgängen in Wein (Abb. 2). Demnach soll Hydrogensulfit, welches durch Protolyse aus schwefliger Säure entsteht, mit dreiwertigem Eisen zu einem Sulfit-Radikal reagieren. Dieses reagiert mit Sauerstoff zu einem Peroxomonosulfat-Radikal, das mit Hydrogensulfit erneut ein Sulfit-Radikal und ein Peroxomonosulfat-Ion bildet. Letzteres reagiert mit Hydrogensulfit zu Sulfat, wodurch das Peroxomonosulfat abgefangen und unschädlich gemacht wird. Ist jedoch keine schweflige Säure mehr im Wein vorhanden, reagiert das Peroxomonosulfat-Ion mit Wasser zu Wasserstoffperoxid und Hydrogensulfat. Da es sich bei Wasserstoffperoxid um ein starkes Oxidationsmittel handelt, werden durch dessen Bildung Oxidationsreaktionen begünstigt.

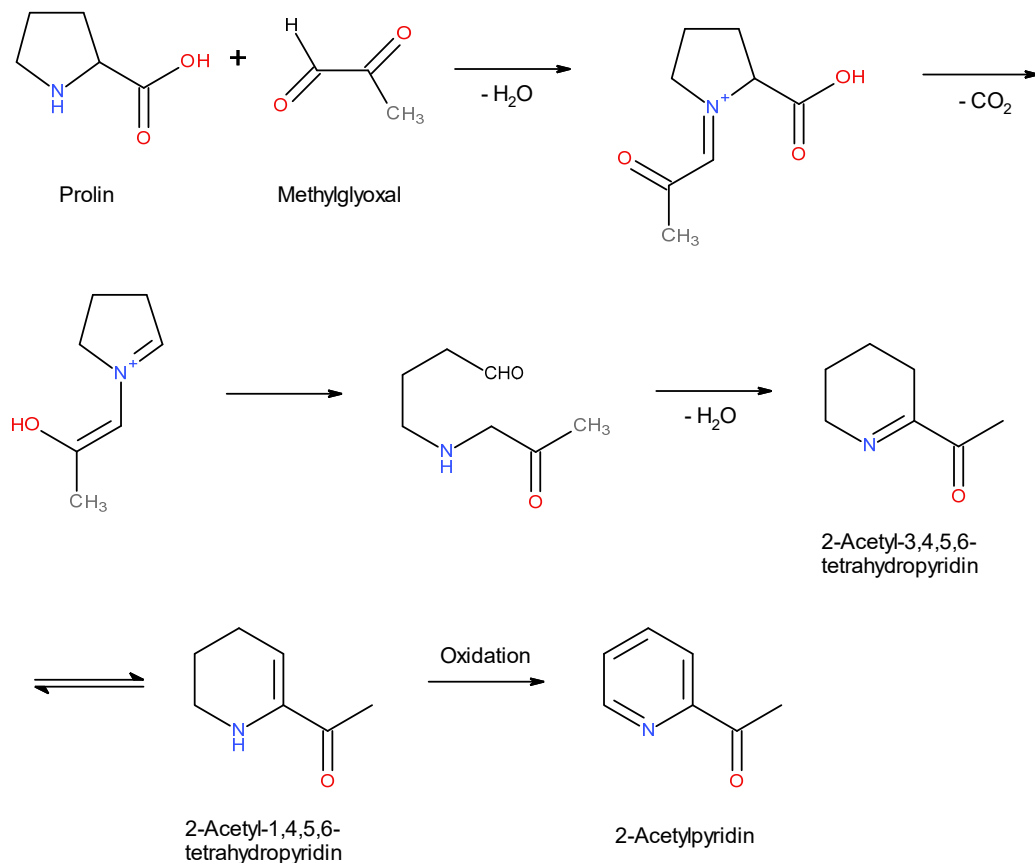


Abb. 1: Chemischer Bildungsweg von ATHP und 2-AP aus Prolin und Methylglyoxal (KÜNZLER und POUR NIKFARDJAM, 2013)

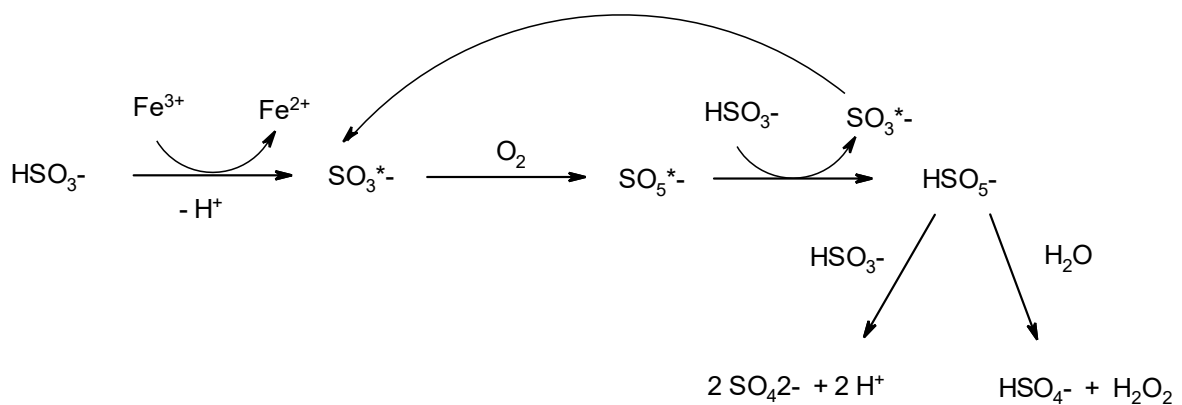


Abb. 2: Reaktion des dreiwertigen Eisens mit Hydrogensulfit und Folgereaktionen (DANILEWICZ und WALLBRIDGE, 2010)

Ein weiterer Prozess, bei dem Wasserstoffperoxid entsteht, ist mit der Oxidation der im Wein enthaltenen Phenole durch dreiwertiges Eisen und zweiwertigem Kupfer als Katalysator verbunden (Abb. 3). Dabei wird durch das entstandene zweiwertige Eisen aus dem Sau-

erstoff Wasserstoffperoxid gebildet. Dieses kann durch schweflige Säure abgefangen werden, wobei Sulfat entsteht. Ist die schweflige Säure bereits verbraucht, kann Wasserstoffperoxid im Wein als starkes Oxidationsmittel weiter reagieren (DANILEWICZ und WALLBRIDGE, 2010).

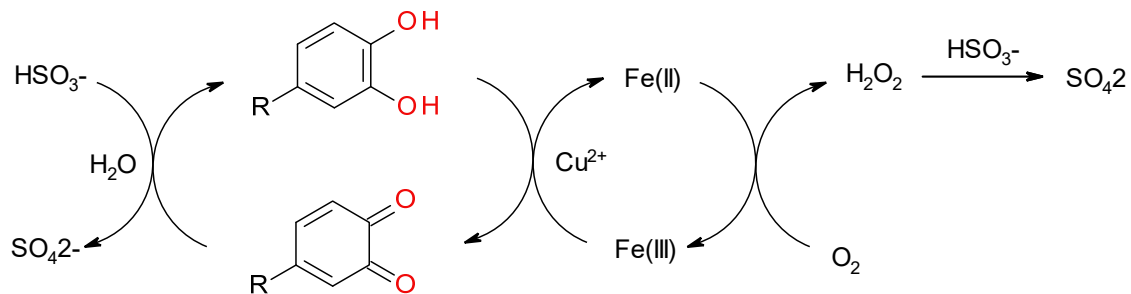


Abb. 3: Oxidation der Phenole durch Eisen und Kupfer (POUR NIKFARDJAM, 2010)

Aus den erläuterten Oxidationsvorgängen geht hervor, dass vor allem Eisen als Oxidationsmittel in Wein reagiert. Dabei agiert Kupfer als Katalysator und kann die Reaktion schon ab einem Gehalt von 0,05 mg/l deutlich beschleunigen (DANILEWICZ und WALLBRIDGE, 2010). Zur Schönung von Wein ist allerdings ein Höchstgehalt von 1 mg/l Kupfer zulässig, wodurch folglich ausreichend Katalysatormenge zur Reaktionsbeschleunigung vorhanden sein kann. Laut eigenen Untersuchungen enthalten Weine aus dem Anbaugebiet Württemberg zwischen 0,2 und 2,6 mg/l Kupfer, im Mittel etwa 0,5 mg/l (POUR NIKFARDJAM, 2010).

Die rein chemische Bildung von ATHP aus Prolin und Methylglyoxal wurde durch KÜNZLER und POUR NIKFARDJAM (2013) in Modellwein nachgewiesen. Dabei ist die von SCHANDERL (1948) als notwendig angesehene Zugabe von Oxidationsmitteln jedoch nicht zwingend erforderlich, allerdings kann ein solcher Zusatz die Reaktion deutlich beschleunigen. Im Gegensatz dazu wird die oxidative Umwandlung von ATHP zu 2-AP durch Zugabe eines Tannins, welches antioxidativ wirkt, verzögert (KÜNZLER und POUR NIKFARDJAM, 2013). Darüber hinaus wurde festgestellt, dass bei den komplexen Oxidationsvorgängen in Wein vor allem Eisen als Oxidationsmittel in Kombination mit Kupfer als Kataly-

sator reagiert (DANILEWICZ und WALLBRIDGE, 2010). Dadurch liegt die Vermutung nahe, dass die Bildung von ATHP und 2-AP in Wein durch das Vorliegen von Eisen und Kupfer beschleunigt werden könnte, wodurch eine zügige Entstehung des Mäuseltons begünstigt wäre. Vor diesem Hintergrund erscheint es sinnvoll, den Einfluss verschiedener Konzentrationen an Eisen und Kupfer auf die Bildung von ATHP und 2-AP aus Prolin und Methylglyoxal in verschiedenen Modellversuchen näher zu untersuchen.

MATERIAL UND METHODEN

Eisen-(II)-chlorid (40 % in H₂O), Kupfersulfat-Pentahydrat (>99 %), L-Prolin (>99 %), Ethanol (>99 %) und L-Weinsäure (>99 %) wurden von VWR (Darmstadt, Deutschland) bezogen. Methylglyoxal (40 % in H₂O) stammte von Sigma-Aldrich (Steinheim, Deutschland). 2-Acetylpyridin (98 %) wurde von Alfa Aesar (Karlsruhe, Deutschland) erhalten. Helium BIP® und Stickstoff für die GC-Analyse waren von Tyczka (Mannheim, Deutschland). Die Mineralsalzmischung "Disal Leicht Salz" stammte von Südsalz (Heilbronn, Deutschland).

Die Untersuchungslösungen wurden mittels statischer

HS-GC-MS auf ihren Gehalt an 2-AP und mittels HS-GC-SNIF auf ihren Gehalt an ATHP untersucht. Dabei wurden ein Turbomatrix Headspace Sampler 40 Trap, Clarus 600 Gaschromatograph und Clarus 600C Massenspektrometer von Perkin Elmer (Überlingen, Deutschland) verwendet. Die olfaktometrische Detektion von ATHP erfolgte über ein Olfactory Detector

Outlet (ODO II) von SGE (Austin, Texas, USA). Für die chromatographische Trennung kam die Trennsäure Zebtron ZB-WAX (100 % Polyethylenglykol), Länge 30 m, ID 0,32 mm, Schichtdicke 0,50 µm von Phenomenex (Aschaffenburg, Deutschland) zum Einsatz. Es wurde mit der Software Turbo Mass (Version 5.4.2, 1617, 2008) von Perkin Elmer (Überlingen, Deutschland) gearbeitet.

Tab. 1: Einstellungen am Headspace-Injektor

Temperatureinstellungen	Zeiteinstellungen	Druckeinstellungen	Sonstiges
Oven 80 °C	Thermo 20 min	Column 15 psi	Operating Mode Trap
Needle 100 °C	Desorb 10 min	Desorb 15 psi	Inject Mode Time
Transferline 150 °C	Dry Purge 5 min	Vial 20 psi	Outlet Split
Trap high 300 °C	Trap Hold 10 min		Dry Purge
Trap low 40 °C	GC Cycle 45 min		Trap Air Toxic
	Decay 1,7 min		
	Pressurize 3 min		

TEMPERATURPROGRAMM

Start: 37 °C (6 min), Ramp 1: 5 °C/min bis 130 °C (1 min), Ramp 2: 10 °C/min bis 220 °C (5 min), Laufzeit: 39,6 min.

MASSENSPEKTROMETER

Full Scan Modus: Masse 40,00 bis 150,00 EI⁺, Messdauer: 12-25 min, Solvent Delay 1: 0-12 min, Solvent Delay 2: 25-39,6 min, Source Temperature: 180 °C, Inlet Line Temperature: 180 °C, Multiplier Current: 400 mV, Electron Energy: 70 eV, Scan Time: 0,2 min, InterScan Time: 0,15 sek

MODELLVERSUCHE

Hierfür wurde ein Modellwein mit 15 mg/l Methylglyoxal, 500 mg/l Prolin und 2 g/l Weinsäure in 10 %-iger ethanolischer Lösung hergestellt. Die Konzentrationen der Ausgangsstoffe entsprachen damit weintypischen Gehalten (DEGEN et al., 2012). Der pH-Wert der Lösung wurde mit 2 N NaOH auf 3,40 eingestellt. Für die Modellversuche wurden dem Modellwein unterschiedliche Konzentrationen an Eisen (0-10 mg/l) und Kupfer (0-1 mg/l) zugegeben und bei 40 °C belassen (Tab. 2). Die Modelllösungen wurden doppelt angesetzt, und es erfolgte eine tägliche Bestimmung von ATHP und 2-AP mittels HS-GC-MS bzw. HS-GC-SNIF.

Für die Messungen von 2-AP wurden pro Headspace Vial 5 ml verdünnte Lösung (1:2) und 1 g Mineralsalzmischung eingesetzt. Die Bestimmung von ATHP erfolgte mit den unverdünnten Lösungen.

Tab. 2: Zusammensetzung der Modelllösungen hinsichtlich Fe(III)- und Cu(II)-Ionengehalt

Modelllösung	Fe ³⁺ -Konzentration (mg/l)	Cu ²⁺ -Konzentration (mg/l)
1	0	0
2	0,1	1
3	1	1
4	10	0
5	0	1
6	10	1

ATHP wurde anhand des typischen röstigen, mäuseartigen Geruchs mittels HS-GC-SNIF identifiziert, da die Substanz als kommerzieller Standard nicht erhältlich ist. Zwar lag ein selbst hergestellter Standard vor, dieser enthielt allerdings nicht unerhebliche Mengen Nebenprodukte aus der Synthese sowie oxidativem Abbau und eignete sich daher nicht zur Quantifizierung. Zur Überprüfung von Retentionszeit (17,4 min) und geruchlicher

Charakteristik konnte er dennoch herangezogen werden. Zur Auswertung diente für 2-AP das charakteristische Massenspektrum (Abb. 4). Abbildung 5 zeigt das Chromatogramm eines 2-AP-Standards mit einer Konzentration von 1.000 µg/l. Demnach ergab sich für 2-AP eine Retentionszeit von 21,5 Minuten. Die Elutionsreihenfolge von ATPH und 2-AP deckt sich folglich mit Angaben aus der Literatur (BUTTERY und LING, 1998).

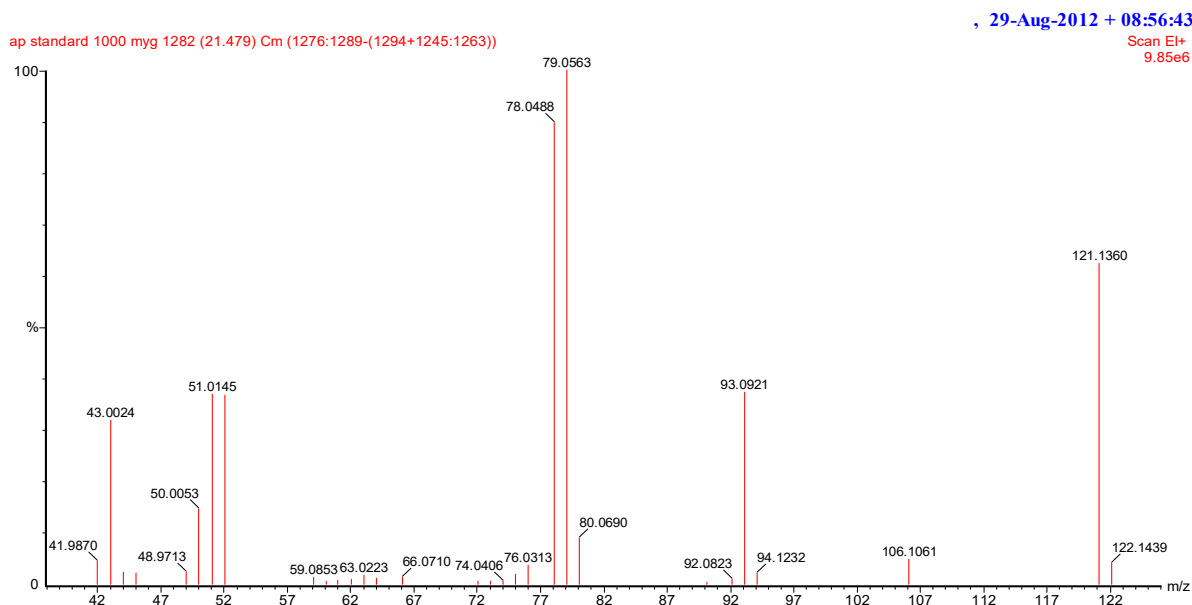


Abb. 4: Massenspektrum von 2-Acetylpyridin

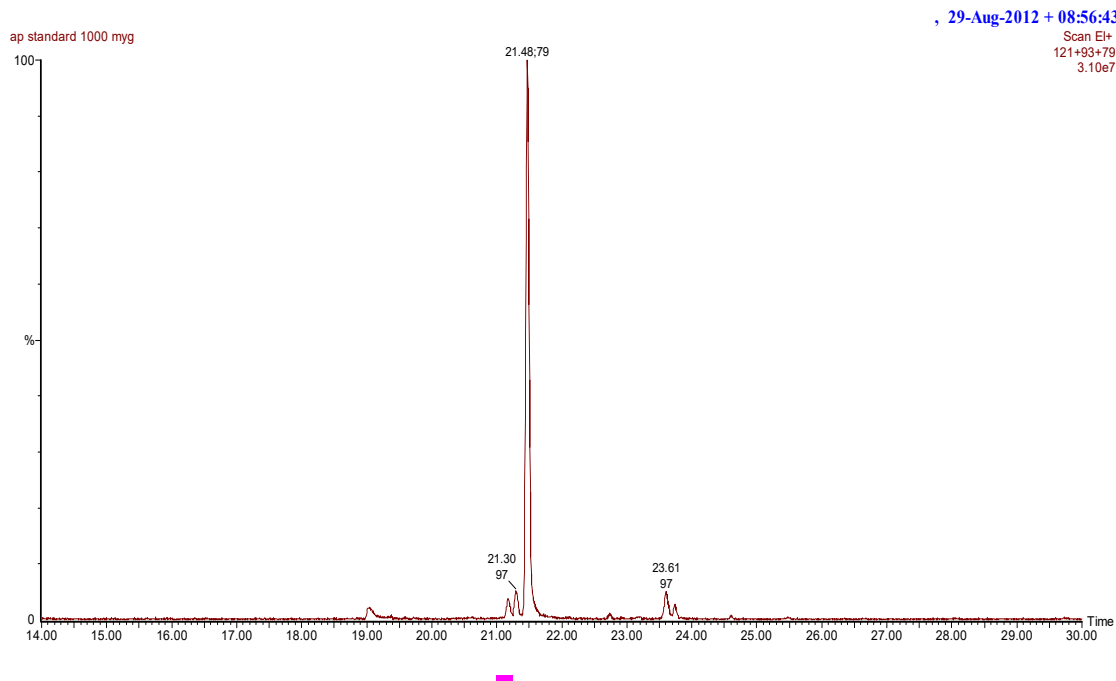


Abb. 5: GC-Chromatogramm eines 1.000 µg/l-Standards von 2-Acetylpyridin

ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Bei den Untersuchungen mittels HS-GC-SNIF konnte bereits nach 24 Stunden in den Ansätzen mit Eisen und Kupfer ein mäuseartiger, röstiger Geruch wahrgenommen werden, der aufgrund der Retentionszeit zwischen 24 und 26 Minuten weder auf ATHP noch auf 2-AP zurückzuführen sein könnte. Es zeigte sich, dass sich die Intensität dieses Geruchs mit steigender Menge an Eisen und Kupfer in den Modelllösungen schneller intensivierte. So war der Geruch in Ansatz 6 (10 mg/l Eisen, 1 mg/l Kupfer) schon nach zwei Tagen deutlich wahrnehmbar, während die Ansätze 2 und 3 (0,1 bzw. 1 mg/l Eisen mit jeweils 1 mg/l Kupfer) erst nach drei Tagen einen deutlichen Mäuselton aufwiesen. Dabei konnte mittels HS-GC-SNIF kein Unterschied in der Intensität des Geruchs von Ansatz 2 und 3 festgestellt werden. Die Modelllösung mit nur einer Komponente in erhöhter Konzentration (Ansätze 4 und 5) entwickelten erst nach vier Tagen in beiden Ansätzen einen deutlichen Mäuselton.

In allen Modelllösungen mit Eisen und Kupfer war nach vier Tagen die Intensität des mäuseartigen Geruchs gleich stark. Selbst nach sieben Tagen Reaktionszeit

konnte keine weitere Veränderung in der Intensität der Mäuselnote festgestellt werden. Im Ansatz 1 ohne jeglichen Metallzusatz wurde hingegen erst nach sieben Tagen ein leichter Mäuselton wahrgenommen. Allerdings konnten weder ATHP noch 2-AP trotz der oxidativen Bedingungen in den Modelllösungen während der Untersuchungen mittels HS-GC-MS in einer der Lösungen identifiziert werden.

Laut der oben dargestellten Ergebnisse aus den Untersuchungen mittels HS-GC-SNIF müsste die Bildung von 2-AP durch die oxidativen Eigenschaften von Eisen und Kupfer beeinflusst werden können und daher von den jeweiligen Konzentrationen dieser Übergangsmetalle abhängig sein. In Bezug auf den in der Einleitung vorgestellten Bildungsweg von ATHP aus Prolin und Methylglyoxal steht dieses Ergebnis jedoch in starkem Widerspruch. Schließlich ist durch keines der beiden Übergangsmetalle eine Beschleunigung zu erwarten, da es sich bei keinem der Reaktionsschritte von den Ausgangsstoffen Prolin und Methylglyoxal zum ATHP um eine Oxidation handelt. Erst die Reaktion vom ATHP zum 2-AP stellt eine Oxidation dar, wodurch sich erst hier überhaupt eine mögliche Beeinflussung durch Eisen oder Kupfer ergäbe. Da in den Modelllösungen al-

lerdings im Vergleich zum Standard weder ATHP noch 2-AP identifiziert werden konnte, liegt die Vermutung nahe, dass es sich bei der Substanz, die mittels HS-GC-SNIF detektiert wurde, um eine Zwischenstufe der Oxidationsreaktion vom ATHP zum 2-AP handelt.

Es ist daher denkbar, dass die Oxidation von ATHP zu 2-AP mehrstufig verläuft. Dabei könnte ATHP im ersten Schritt durch Abgabe zweier Protonen und Elektronen zu 2-Acetyl-1,4-dihydropyridin oxidiert werden. Die Einführung einer zusätzlichen Doppelbindung im Sechsering würde auch die erhöhte Retentionszeit im Vergleich zum 2-AP erklären. Durch die Abgabe zwei

weiterer Protonen und Elektronen entstünde dann 2-AP (Abb. 6). Eigentlich sollte die Bildung von 2-AP bevorzugt ablaufen, da es sich hierbei um ein energiearmes, mesomeriestabilisiertes, aromatisches System handelt. Es ist aber zu bedenken, dass die Modelllösungen einen pH-Wert von 3,40 aufwiesen, wodurch eine Protonenabgabe an die Umgebung möglicherweise erschwert war. So könnte unter diesen Bedingungen die Reaktion von 2-Acetyl-1,4-dihydropyridin zu 2-AP stark gebremst werden. Dies würde das Fehlen von 2-AP in den Lösungen erklären. Demnach müsste auch 2-Acetyl-1,4-dihydropyridin zum mäuseartigen Fehl aroma in Wein beitragen.

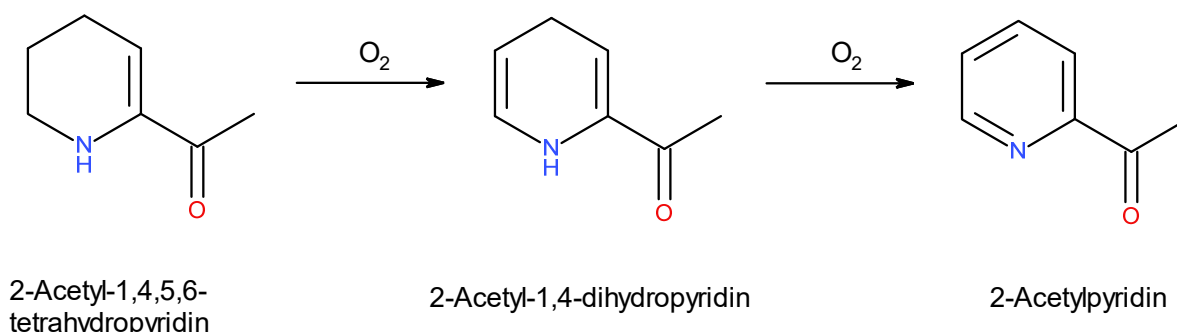


Abb. 6: Postulierte oxidative Bildung von 2-Acetylpyridin aus 2-Acetyl-1,4,5,6-tetrahydropyridin über 2-Acetyl-1,4-dihydropyridin

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass aus Prolin und Methylglyoxal auf chemischem Wege unter Weinbedingungen zweifellos ein röstiges, mäuseartiges Fehl aroma entsteht. Dabei scheinen jedoch nicht nur ATHP und 2-AP für dieses Aroma verantwortlich zu sein. Es konnte gezeigt werden, dass durch Übergangsmetalle, wie Eisen und Kupfer, die oxidative Bildung einer weiteren Substanz neben 2-AP möglich ist. Folglich kann es sich bei dieser Substanz nicht um ATHP han-

deln, da dessen Bildung oxidationsunabhängig erfolgt und daher nicht durch Übergangsmetalle beeinflussbar sein kann. Bei der neuen Substanz könnte es sich um 2-Acetyl-1,4-dihydropyridin, ein Zwischenprodukt der Oxidation von ATHP zu 2-AP, handeln. Weitere Studien müssen daher klären, ob diese Substanz tatsächlich zu einem mäuseartigen Geruch beiträgt und unter welchen Bedingungen, insbesondere auch im Hinblick auf höhere pH-Werte, die Reaktion zu 2-AP stattfindet.

LITERATUR

BELITZ, H. D., GROSCH, W. UND SCHIEBERLE, P. 2008: Lehrbuch der Lebensmittelchemie. 6. Auflage -, Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 326 ff.

BUTTERY, R. G. UND LING, L. C. 1998: Additional Studies on Flavor Components of Corn Tortilla Chips. J. Agric. Food Chem. 46: 2764-2769.

COSTELLO, P. J. UND HENSCHKE, P. A. 2002: Mousy Off-Flavor of Wine: Precursors and Biosynthesis of the Causative N-Heterocycles 2-Ethyltetrahydropyridine, 2-Acetyltetrahydropyridine, and 2-Acetyl-1-pyrroline by *Lactobacillus hilgardii* DSM 20176. J. Agric. Food Chem. 50: 7079-7087.

DANILEWICZ, J. C. 2003: Review of reaction mechanisms of oxygen and proposed intermediate reduction

- products in wine: Central role of iron and copper. *Am. J. Enol. Vitic.* 54: 73-85.
- DANILEWICZ, J. C. UND WALLBRIDGE, P. J. 2010: Further studies on the Mechanism of Interaction of Polyphenols, Oxygen, and Sulfite in Wine. *Am. J. Enol. Vitic.* 61 (2): 166-175.
- DEGEN, J., HELLWIG, M. UND HENLE, T. 2012: 1,2-Dicarbonyl Compounds in Commonly Consumed Foods. *J. Agric. Food Chem.* 60: 7071-7079.
- GRBIN, P. R., COSTELLO, P. J., HERDERICH, M., MARKIDES, A. J., HENSCHKE, P. A. UND LEE, T. H. 1995: Developments in the sensory, chemical and microbiological basis of mousy taint in wine. *Proc. Ninth Austral. Wine Industry Technical Conference. – Adelaide (South Australia), 1995*
- HERESZTYN, T. 1986: Formation of substituted tetrahydropyridines by species of *Brettanomyces* and *Lactobacillus* isolated from mousy wines. *Amer. J. Enol. Vitic.* 37: 127-132.
- KÜNZLER, L. UND POUR NIKFARDJAM, M. 2013: Untersuchungen zur Entstehung von 2-Acetylpyridin und des Mäuseltons in Wein. *Mitteilungen Klosterneuburg* 63: 187-198.
- LAY, H. 2003: Untersuchungen über die Entstehung des „Mäuseltons“ in Wein und Modelllösungen. *Mitteilungen Klosterneuburg* 53: 243-250.
- POUR NIKFARDJAM, M. 2010: Starke Oxidantien im Wein. *Der Deutsche Weinbau* 25: 32-34.
- SCHANDERL, H. 1948: Die Ursachen der Mäuselkrankheit der Weine. *Schweiz. Z. Obst- u. Weinbau* 57: 301-305.
- SNOWDON, E. M., BOWYER, M. C., GRBIN, P. R. AND BOWYER, P. K. 2006: Mousy Off-Flavor: A Review. *J. Agric. Food Chem.* 54: 6465-6474.
- STRAUSS, C.R. UND HERESZTYN, T. 1984: 2-Acetyl-tetrahydropyridines – a cause of the “mousy“ taint in wine. *Chemistry and Industry* (2): 109-110.
- TEMPÈRE, S., CHATELET, B., DE REVEL, G., DUFOIR, M., DENAT, M., RAMONET P.Y., MARCHAND, S., SADOUDI, M., RICHARD, N., LUCAS, P., MIOT-SERTIER, C., CLAISSE, O., RIQUIER, L., PERELLO, M.C. UND BALLESTRA, P. 2019: Comparison between standardized sensory methods used to evaluate the mousy off-flavour in red wine. *OENO One* 2: 95-105.
- TUCKNOTT, O.G. 1977: The mousy taint in fermented beverages: it's nature and origin. – Ph. D. Thesis University of Bistol, 1977
- WANG, Y. UND HO, C. T. 2012: Flavour chemistry of methylglyoxal and glyoxal. *Chem. Soc. Rev.*, 41: 4140-4149.

Eingelangt am 19. November 2020